

УДК 616 – 089.23 – 071.001.5

Васильчук А. С.

**КАРТА ТЕРМОПЛАСТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СТОМАТОЛОГИИ**

Основными материалами при изготовлении ортодонтических аппаратов в стоматологии десятилетиями являются самотвердеющие пластмассы «Протакрил», и «Редонт – 03», последние годы широкое применение при протезировании получили термопласты, в частности полипропилен, нейлон. Экспериментальные исследования, приведенные в работе [1], направлены, главным образом, на определение стандартных физико-механических характеристик, таких как микротвердость, предел прочности, временное сопротивление разрыву, предел прочности при изгибе, ударная вязкость.

Указанные физико-механические характеристики не в полной мере определяют способность изделий из указанных материалов подвергаться эксплуатационным нагрузкам, быть достаточно надёжными, прочными, пластичными, износостойкими.

В качестве основного материала для ортодонтических аппаратов в дальнейшем принят полипропилен. Оценка надёжности изделий из указанных выше материалов не может осуществляться в полной мере без глубоких знаний их физико-механических характеристик, на наш взгляд следует рассматривать также другие характеристики, применяемые в современных феноменологических теориях, касающихся деформации твёрдых тел [2, 3]. Особенную роль в оценке физико-механических свойств играет модуль эластичности, который характеризуется тангенсом угла наклона прямой в координатах: интенсивность напряжений  $\sigma_i$ , интенсивность деформаций  $e_i$  на начальной стадии упруго-пластического деформирования, когда интенсивность деформаций не превышает  $e_i < 0,05$ .

Информация о модуле эластичности позволяет установить способность материала к восстановлению своей первоначальной формы после статических нагрузок. Наряду с таким параметром, как вязкость (способность к энергопоглощению), значение модуля эластичности (flexural module) в определенных границах позволяет увеличить долговечность стоматологических конструкций, что существенно уменьшает вероятность поломок.

Для расширения возможностей использовать информацию о физико-механических характеристиках стоматологических материалов предлагается рассматривать не только сравнительные стандартные механические характеристики, но и ввести новые параметры в виде функций, такие как кривые деформирования (кривые течения в терминах теории пластичности) в координатах  $\sigma_i = f(e_i)$ , где:

– интенсивность напряжений:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}; \quad (1)$$

– интенсивность деформаций:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}, \quad (2)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные деформации.

Отметим также, что при прочих равных условиях (например, при совпадении пределов прочности на растяжения) нельзя судить о способности материала к энергопоглощению.

Следовательно, очевидным стаёт актуальность вопроса сравнительной оценки физико-механических свойств материалов, применяемых в стоматологии с точки зрения указанных выше параметров. Кроме того, представляет интерес изучение влияния таких факторов, как температура расплава, реализуемая при изготовлении базиса ортодонтических аппаратов на такие характеристики как твердость, модуль эластичности и вязкость.

В работе [4] исследованы физико-механические свойства материалов, применяемых в стоматологии, в частности полипропилена марки «Липол». Изучено влияние температуры расплава полипропилена на механические характеристики. Показано, что с ростом температуры расплава от 193 °С до 213 °С модуль эластичности снижается, что характеризует уменьшение склонности к излому заготовок из полипропилена.

В этой же работе показано, что вязкость заготовок из полипропилена, полученного при температуре расплава около 213 °С ниже вязкости полипропилена, полученного при температуре расплава около 193 °С.

В дальнейшем нас будет интересовать возможность получения некоторых механических характеристик полипропилена без привлечения таких трудоемких испытаний, как растяжение, сжатие, изгиб. Рассмотрим новую методику испытаний заготовок из полипропилена, основанную на измерении твердости по Либу.

В работе [5] введена характеристика пластичности материалов  $\delta_H$ , определяемая как доля пластической деформации в общей деформации при внедрении индикатора в образец. Получено аналитическое выражение для упругой деформации  $\varepsilon_c$  и общей деформации  $\varepsilon$  на контактной площадке индикатор-образец в направлении действия силы. В этой же работе приведено соотношение:

$$\varepsilon_c = 1,08 (1 - \mu - 2\mu^2) \frac{HV}{E}; \quad (3)$$

$$\delta_H = 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;

$HV$  – твердость по Виккерсу;

$E$  – модуль упругости, МПа;

$\varepsilon$  – общая деформация ( $\varepsilon \approx 0,076$ ).

В этой же работе установлено также наличие критического значения пластичности  $\delta_H \approx 0,9$ , достижение которой является необходимым условием для проявления пластичности при испытании материалов на растяжение и изгиб.

Из формул (3), (4) следует, что предложенная характеристика пластичности определяется, в основном, отношением твердости к модулю упругости  $HV/E$ . Известно, что не только твердость  $HV$ , но и модуль Юнга определяют при локальном нагружении материала индентором при использовании метода измерения твердости по глубине внедрения [6, 7]. Параметр  $\mu$  оказывает более слабое влияние на пластичность  $\varepsilon_c$  и в большинстве случаев можно принять  $\mu = 0,3$  для металлов и  $\mu = 0,2$  для керамики.

Как известно, твердость обладает максимальной зависимостью – возрастает с уменьшением размера отпечатка. Это явление находит объяснение в связи с уменьшением доли пластической деформации при уменьшении размера отпечатка [8]. В связи с этим параметр  $\delta_H$  также должен обладать масштабной зависимостью – снижаться при уменьшении размера отпечатка.

Используя изложенные представления о связи параметра  $\delta_H$  и таких характеристик, как твердость и модуль упругости, в дальнейшем исследовали указанные зависимости при изучении технологии получения ортодонтических аппаратов. С этой целью изготовили плоские квадратные образцы из полипропилена размерами 40 × 40 × 5 мм. Термопластические массы получили с помощью приспособления, разработанного на кафедре стоматологии детского возраста Винницкого медицинского университета им. Н. И. Пирогова.

По методике, изложенной в [4], строили кривые течения в координатах  $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ . При этом образцы для испытания изготовили по технологии при температурах расплава  $t_1 = 173$  °С,  $t_2 = 180$  °С,  $t_3 = 191$  °С,  $t_4 = 193$  °С,  $t_5 = 213$  °С,  $t_6 = 245$  °С и  $t_7 = 290$  °С.

На рис. 1 показаны кривые течения полипропилена, полученные при указанных выше температурах. Кривые аппроксимировали уравнением:

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^n, \quad (5)$$

где  $A$ ,  $n$  – коэффициенты, имеющие физический смысл.

Так коэффициент  $A$  равен интенсивности напряжений при интенсивности деформаций равной единице;  $n$  равен критической интенсивности деформаций в момент условного максимального напряжения. В нашем случае коэффициент  $A = 50$  МПа при температуре расплава  $t_1 = 193$  °С и  $A = 45$  МПа при  $t_2 = 213$  °С, т. е. наблюдается снижение коэффициента  $A$  с ростом температуры расплава. На квадратных образцах, изготовленных из термопластических масс с размерами  $40 \times 40 \times 5$  мм, измеряли твердость по Либу, используя переносной твердомер – модернизированный микропроцессорный программируемый прибор ТЕМП-2 и ТЕМП-3. Указанные твердомеры предназначены для неразрушающего контроля твердости по шкалам Бринелля, Роквелла, Виккерса и Шора. Принцип работы прибора – динамический. Приборы зарегистрированы в государственных реестрах России, Украины и Белоруссии.

На каждой из пластин делали по 12 измерений твердости по Либу. Среднее 12 измерений принимали за число твердости данной пластины, изготовленной при одной из указанных температур расплава. Оказалось, что с увеличением температуры расплава уменьшается твердость также, как в работе [4] уменьшается вязкость и модуль эластичности. При этом снижение твердости следует линейному закону:

$$\Delta H = 0,11 \Delta t, \quad (6)$$

где  $\Delta H$  – твердость МПа;

$\Delta t$  – перепад температур, °С.

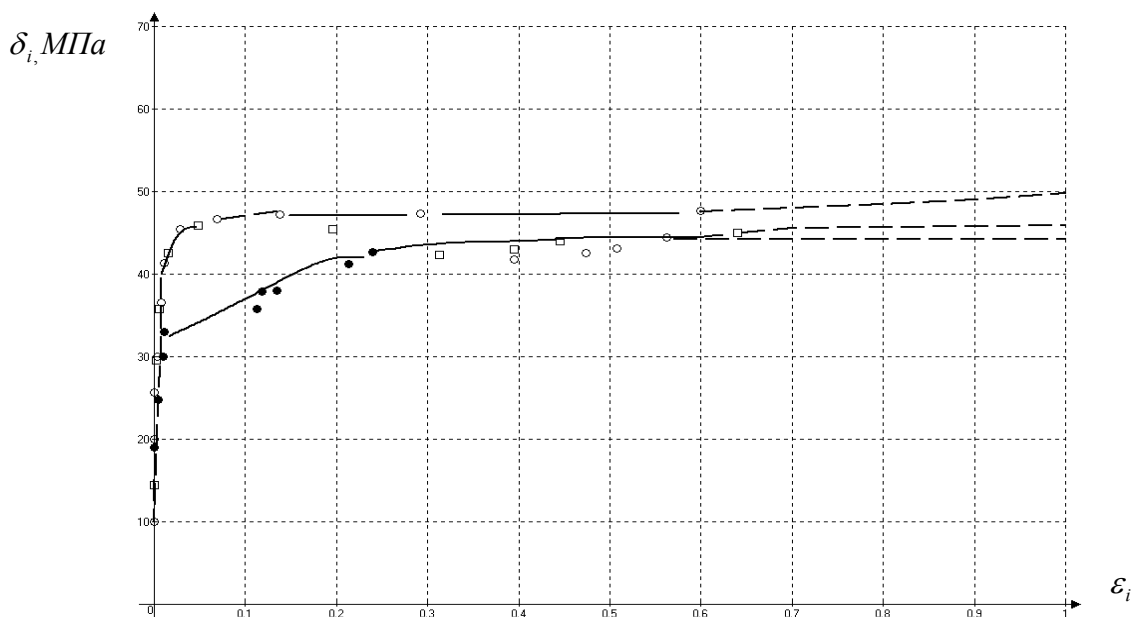


Рис. 1. Кривые течения полипропилена, полученные при различных температурах расплава:

○ – 173 °С, 26.11.08; □ – 180 °С, 26.11.08; ● – 194 °С, 28.11.08

○	$\begin{cases} A = 50 \text{ МПа} \\ n = 0.035 \end{cases}$	173 °	$\begin{cases} W_{y\delta} = 11,5 \text{ МПа} \\ W_{y\delta} = 23,57 \text{ МПа} \\ W_{y\delta} = 35,87 \text{ МПа} \end{cases}$
□	$\begin{cases} A = 47,5 \text{ МПа} \\ n = 0.072 \end{cases}$	194 °	$\begin{cases} W_{y\delta} = 8,5 \text{ МПа} \\ W_{y\delta} = 18,49 \text{ МПа} \\ W_{y\delta} = 29,11 \text{ МПа} \end{cases}$

$$\bullet \begin{cases} A = 45 \text{ МПа} \\ n = 0.12 \end{cases} \quad 180^\circ \begin{cases} W_{y\delta} = 10,02 \text{ МПа} \\ W_{y\delta} = 21,1 \text{ МПа} \\ W_{y\delta} = 32,55 \text{ МПа} \end{cases}$$

○ –  $t = 173 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_{0.2} = 10 \text{ МПа}$ ;  $A = 50 \text{ МПа}$ ;  $n = 0,035$ ;  $E' = 2958 \text{ МПа}$ ;

□ –  $t = 180 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_{0.2} = 14 \text{ МПа}$ ;  $A = 47,5 \text{ МПа}$ ;  $n = 0,072$ ;  $E' = 5585 \text{ МПа}$ ;

● –  $t = 194 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\sigma_{0.2} = 10 \text{ МПа}$ ;  $A = 45 \text{ МПа}$ ;  $n = 0,12$ ;  $E' = 4433 \text{ МПа}$

На рис. 2 показана зависимость твердости от температуры расплава. Как следует из рис. 2, с увеличением температуры расплава от  $193 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $290 \text{ }^\circ\text{C}$  твердость падает от  $41 \text{ МПа}$  до  $33 \text{ МПа}$ . Следуя работе [5], определим величину меры пластичности  $\delta_n$  по формуле (3), при этом модуль Юнга  $E$  примем равным  $800 \text{ МПа}$ , постоянным для различных температур расплава.

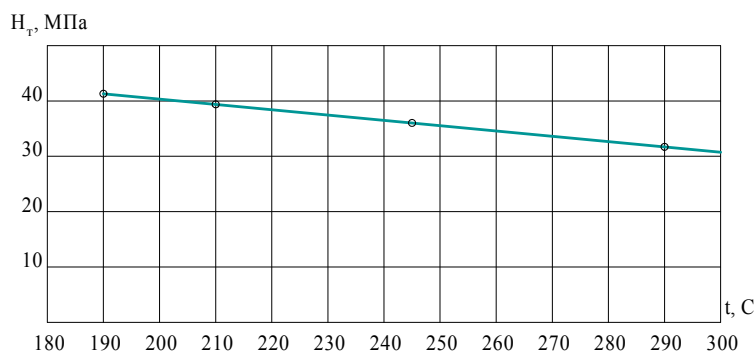


Рис. 2. Влияние температуры расплава полипропилена на твердость

На рис. 3 показана зависимость  $\delta_n$  от температуры расплава. Как следует из рисунка, с увеличением температуры расплава, характеристика пластичности  $\delta_n$  (доля пластической деформации в общей упруго-пластической деформации) возрастает.

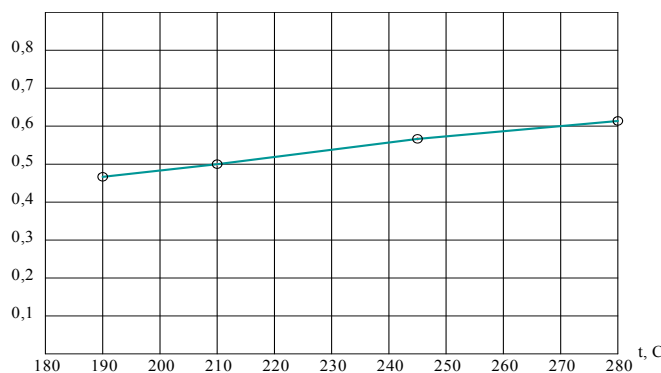


Рис. 3. Зависимость характеристики пластичности от температуры расплава

Важным параметром, который определяет надежность и работоспособность ортодонтических аппаратов в стоматологии, является параметр вязкости (удельной потенциальной энергии, измеряемой в МПа). Величину удельной потенциальной энергии определяли интегрированием функции кривой течения материала:

$$W_{\delta\ddot{a}} = \int_0^{\varepsilon_i^*} \sigma_i d\varepsilon_i = A \int_0^{\varepsilon_i^*} \varepsilon_i^n d\varepsilon_i = A \frac{\varepsilon_i^{n+1}}{n+1}. \quad (7)$$

Значения  $W_{y\delta}$  рассчитывали для каждого испытуемого материала, полученного при температурах расплава  $t = 193 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t = 203 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t = 213 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t = 245 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t = 290 \text{ }^\circ\text{C}$ . При этом верхняя граница интеграла соотношения (7) равнялась  $\varepsilon_i = 0,25; 0,5; 0,75$ .

## ВЫВОДЫ

Разработана карта материалов, применяемых в стоматологии, характеризующая физико-механические характеристики термопластов – полипропиленов.

Наряду со стандартными характеристиками: микротвердость, предел прочности, временное сопротивление разрыву, предел прочности при изгибе, ударная вязкость, получены такие характеристики, как кривая течения, модуль эластичности, параметры вязкости, твердость, а также характеристика пластичности  $\delta_n$ , определяемая как доля пластичности общей деформации при внедрении индентора в испытуемый образец.

Исследовано влияние температуры расплава полипропиленов марки «Липол», применяемых в стоматологии и других отраслях техники, на механические характеристики, такие как твердость, пластичность  $\delta_n$ , определяемая как доля пластической деформации в общей деформации. Показано, что с ростом температуры расплава заготовок твердость уменьшается, следуя линейной зависимости  $\Delta H = 0,11 t \text{ } ^\circ\text{C}$ , а характеристика пластичности возрастает.

Рациональной с точки зрения таких характеристик, как вязкость, модуль эластичности, твердость и пластичность, является температура в интервале 200–213  $^\circ\text{C}$ , при этом модуль эластичности находится в пределах, обеспечивающих уменьшение склонности полипропилена к разлому, а характеристика пластичности возрастает при уменьшении твердости.

Предложен способ определения параметра пластичности измерением твердости по Лību.

Изучено влияние температуры расплава полипропилена на механические характеристики. Показано, что с ростом температуры расплава от 193  $^\circ\text{C}$  до 213  $^\circ\text{C}$  модуль эластичности снижается примерно вдвое, что характеризует уменьшение их склонности к разлому.

Вязкость полипропиленов, изготовленных из заготовок, температура расплава которых составила 213  $^\circ\text{C}$ , ниже вязкости полипропиленов, температура расплава которых составила 193  $^\circ\text{C}$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Применение термопластических материалов в стоматологии* / Тригубов И. Д., Михайленко Л. В., Болдырева Р. И. и др.] – Москва, 2007. – 197 с.
2. *Огородников В. А. Розробка паспорту фізико-механічних властивостей стоматологічних матеріалів* / В. А. Огородников, А. С. Васильчук // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2008. – № 5 (80). – С. 128.
3. *Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением* / В. А. Огородников. – К. : Вища школа, 1983. – 175 с.
4. *Огородников В. А. Фізико-механічні характеристики термопластмас та надійність ортодонтичних апаратів* / В. А. Огородников, Ю. С. Бікс, О. С. Васильчук // *Вінницького державного аграрного університету : збірник наукових праць*. – 2009. – Вип. 2. – № 2. – С. 67–71. – (Серія «Технічні науки»).
5. *Мильман Ю. В. Характеристика пластичности, получаемая при измерении твердости : научное издание* / Ю. В. Мильман, Б. А. Галанов, С. И. Чугунова. – Киев : Институт проблем материаловедения им. И. М. Францевича НАН Украины, 1992. – 23 с.
6. *Галанов Б. А. Определение твердости и модуля Юнга при упруго-пластическом внедрении индентора в материалы* / Б. А. Галанов, О. Н. Григорьев, Ю. В. Мильман и др. // *Доклады АН СССР*. – 1984. – 274. – № 4. – С. 815–817.
7. *Определение твердости и модуля Юнга по глубине внедрения пирамидального индентора* / Б. А. Галанов, О. Н. Григорьев, Ю. В. Мильман, И. Л. Рагозин // *Проблемы прочности*. – 1983. – № 11. – С. 93–96.
8. *Мильман Ю. В. Зависимость твердости от нагрузки на индентор и твердость при фиксированной диагонали отпечатка* / Ю. В. Мильман // *Проблемы прочности*. – 1990. – № 6. – С. 52–56.

Васильчук А. С. – ассистент ВНМУ.

ВНМУ – Винницкий национальный медицинский университет имени Н. И. Пирогова, г. Винница.

E-mail: ortosto@ukr.net

Статья поступила в редакцию 13.09.2013 г.